PART2 空気塊にはたらく力

目標　空気塊にはたらく 4 つの力を挙げ，それぞれの性質を説明できる。

Chapter1　気圧傾度力

空気塊の運動を考えるとき，空気塊にはたらく力を知ることは大切です。まず，つねに考慮すべき力として気圧傾度力について学びましょう。

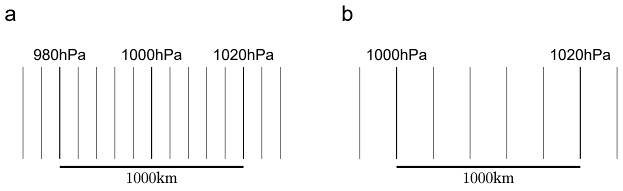
知ってこよう

ここでは風の吹き方を考えるため，水平方向にはたらく力に着目します。鉛直方向にはたらく力としては重力があります。

気圧傾度力

・**気圧傾度**

単位距離あたりの気圧差を**気圧傾度**という。



a の等圧線の間隔は 100km で，気圧傾度は

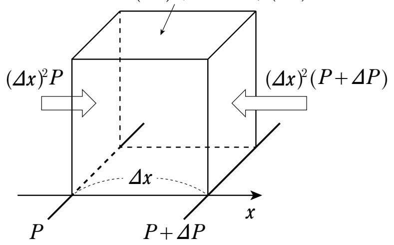
$$\frac{1020\text{hPa}-980\text{hPa}}{1000\text{km}}=0.04\text{hPa/km}$$

b の等圧線の間隔は 200km で，気圧傾度は

$$\frac{1020\text{hPa}-1000\text{hPa}}{1000\text{km}}=0.02\text{hPa/km}$$

→気圧傾度は等圧線の間隔に（比例 / 反比例）する。

・気圧傾度力



空気の密度をρとして，一辺の長さがΔx の立方体の向かい合う 2 面の圧力がΔP だけ異なるとする。図の x 軸方向の加速度を a_Gとおくと，x 軸方向の運動方程式は

$$\rho(\Delta x)^3 \cdot a_G = (\Delta x)^2 P - (\Delta x)^2 (P + \Delta P)$$

と表せる。よって，

$$a_G = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta x}$$

であり，この加速度を生じる力を**気圧傾度力**という。

単位質量の空気塊にはたらく気圧傾度力の大きさは気圧傾度に（比例 / 反比例）する。また，気圧傾度力は等圧線と直交して高圧側から低圧側に向かってはたらく。

復習

運動方程式（物理基礎）
質量 m の物体に力 F を加えたときの加速度を a とすると

$$ma = F$$

が成り立ち，これを**運動方程式**という。運動方程式は

$$a = \frac{F}{m}$$

と表せるので，加速度は単位質量の物体にはたらく力だといえる。

まとめ

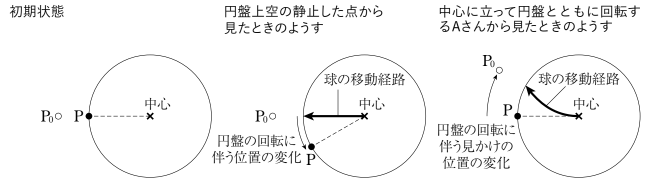
・＿＿＿＿＿あたりの気圧差を気圧傾度といい，それによる力を＿＿＿＿＿＿という。
・その力の大きさは気圧傾度に＿＿＿し，等圧線と直交して＿＿＿＿側から＿＿＿＿側に向かってはたらく。

Chapter2　転向力

私たちは，空気塊の運動を自転する地表面から見たときの運動として表現します。ここでは，地球の自転によって生じる見かけの力である転向力について学びましょう。なお，Chapter2，Chapter3 の式の導出過程は物理の内容を含んでやや難しいので，大まかな流れをつかむだけでもかまいません。ただし，結果はしっかりと覚えておきましょう。

転向力

・回転する円盤上における物体の運動



反時計回りに回転する円盤を考える。中心に立っている A さんが円盤の外の点 P_0 に向かって球を投げる。このとき，球は中心と P_0 とを結ぶ線分上の点 P を通ることが予想される。

<u>球の経路を円盤上空の静止した点から見たとき</u>

球は中心から P_0 に向かって直進〔等速直線運動〕する。

<u>球の経路を円盤とともに回転する A さんから見たとき</u>

はじめ P_0 と P は重なって見えるが，円盤の回転に伴って P_0 は P の右側に見えるようになる。球も同様に P の右側にずれていき，球が円盤の縁に到達したとき，球は P の右側にある。

知っておこう

ここでの角速度の単位は rad/s〔ラジアン毎秒〕を用います。角度が弧度法（☞数学Ⅱ）で表されていることに注意してください。

・回転する円盤上の物体にはたらく転向力

速さを v，微小な経過時間を Δt とすると，移動距離は $v\Delta t$ である。円盤の角速度を ω とすると回転角は $\omega\Delta t$ であり，y 軸方向の変位は $(v\Delta t)(\omega\Delta t)=v\omega(\Delta t)^2$ と近似できる。

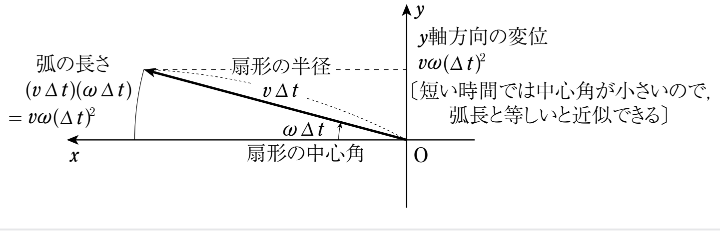
復習

扇形の弧長（数学Ⅱ）

中心角 θ を弧度法で表したとき，半径 r の扇形の弧の長さ l は

$$l = r\theta$$

と表せる。



図の y 軸方向の加速度を a_C として等加速度直線運動の公式を用いると，y 軸方向の初速が 0 であることから

$$\frac{1}{2}a_C(\Delta t)^2 = v\omega(\Delta t)^2$$

$$a_C = 2v\omega \qquad \cdots\cdots(*)$$

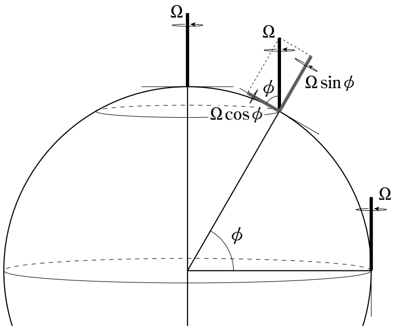
が得られる。この加速度を生じる見かけの力を**転向力**という。

単位質量の物体にはたらく転向力の大きさは運動の速さと角速度に比例する。また，反時計回りに回転する円盤上において，転向力は物体の進行方向から直角（右 / 左）向きにはたらく。

知っておこう

物体が想定よりも右にあるのは，右向きに何らかの力がはたらいたからだと考えます。実際には観察者のいる円盤が回転したのであって力がはたらいたわけではないので，この力は見かけの力と呼ばれています。

・地球上の物体にはたらく転向力



知っておこう

赤道でも地表面は回転していますが，その回転の軸は水平面と平行です。回転する円盤の例でいえば円盤の直径を軸としたような回転をしていて，円盤と垂直な軸のまわりの回転はしていないのです。

図のように考えると，(*) の角速度 ω，すなわち地表面と垂直な軸のまわりの回転角速度は，地球の自転角速度 Ω と緯度 ϕ を用いて $\omega = \Omega\sin\phi$ と表せる。これを (*) に代入すると，

$$a_C = 2v\Omega\sin\phi$$

が得られる。

すなわち，単位質量の空気塊にはたらく転向力の大きさは水平面上での風速と緯度の正弦〔sin〕との積に比例する。また，自転が反時計回りの（北半球 / 南半球）において，転向力は空気塊の進行方向から直角（右 / 左）向きにはたらく。

覚えておこう

転向力の向きは，回転の向きによって変化します。自転の向きが北半球とは逆向きになる南半球では，転向力のはたらく向きも北半球とは逆向きになるのです。

まとめ

・自転する地球上で観察したとき，運動する空気塊の進行方向を変えるようにはたらいて見える力を________という。

・その力の大きさは風速と緯度の______との積に比例し，北半球では空気塊の進行方向から直角____向きにはたらく。

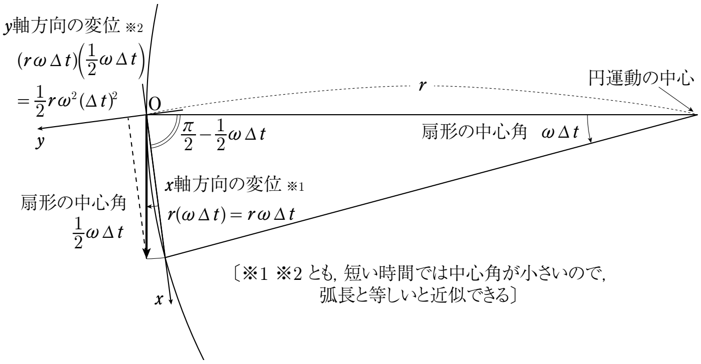
Chapter3　遠心力と摩擦力

空気塊の運動を考えるとき，条件によっては遠心力や摩擦力も重要になってきます。ここでは，これらの力について学びましょう。

遠心力

・等速円運動と遠心力

ある点を中心として速さ v で等速円運動する質量 m の空気塊について考える。慣性の法則により，この空気塊は速さ v で直進しようとしている。円運動している空気塊からは，円の外側に向けられようとしているように見える。



円運動の半径を r，角速度を ω とする。微小な経過時間を Δt とすると，回転角は $\omega\Delta t$，x 軸方向の変位は $r\omega\Delta t$ である。このとき，y 軸方向の変位は $\frac{1}{2}r\omega^2(\Delta t)^2$ と近似できる。

図の y 軸方向の加速度を a_F として等加速度直線運動の公式を用いると，y 軸方向の初速が 0 であることから

$$\frac{1}{2}a_F(\Delta t)^2=\frac{1}{2}r\omega^2(\Delta t)^2$$

$$a_F=r\omega^2 \qquad \cdots\cdots(**)$$

が得られる。この加速度を生じる見かけの力を**遠心力**という。

ここで，空気塊の速さを用いると空気塊の移動距離は $v\Delta t$ と表せる。よって，$r\omega\Delta t=v\Delta t$ より $\omega=\frac{v}{r}$ が成り立ち，$(**)$ は

$$a_F=r\left(\frac{v}{r}\right)^2$$

$$=\frac{v^2}{r}$$

と表せる。

すなわち，単位質量の空気塊にはたらく遠心力の大きさは（風速 / 風速の 2 乗）に（比例 / 反比例）し，円運動の半径に（比例 / 反比例）する。また，遠心力は円運動の中心と反対方向にはたらく。

摩擦力

・空気塊の受ける摩擦力

地表付近では，風の流れが乱される。このことによる加速度を a_D とおくと，風速が v のとき

$$a_D = -kv$$

と表せて〔k は条件によって異なる正の定数〕，この加速度を生じる力を**摩擦力**という。

単位質量の空気塊にはたらく摩擦力の大きさは風速に比例し，進行方向と（同じ / 逆の / 直交する）向きにはたらく。また，比例定数 k は海上とくらべて陸上の方が（大きい / 小さい）。

知っておこう

左の力には摩擦力という名前がついていますが，物理で学ぶ摩擦力の式と違うことに戸惑った人もいるかもしれません。空気塊にはたらく摩擦力は風の流れの乱れによる力であり，固体どうしが接触している面ではたらく摩擦力とは異なる性質をもっているのです。

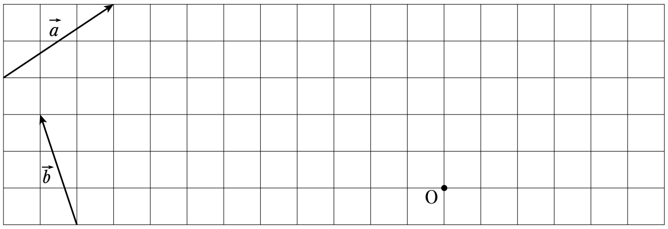
まとめ

・空気塊が円運動するとき，円運動の中心と逆向きにはたらいて見える力を＿＿＿＿＿という。
・その力の大きさは＿＿＿＿＿＿に比例して，円運動の半径に反比例する。
・空気塊が地表付近を進むとき，風の流れが乱されることで進行方向と逆向きにはたらく力を＿＿＿＿＿という。
・その力の大きさは風速に比例して，同じ風速であれば海上とくらべて陸上の方が＿＿＿＿＿。

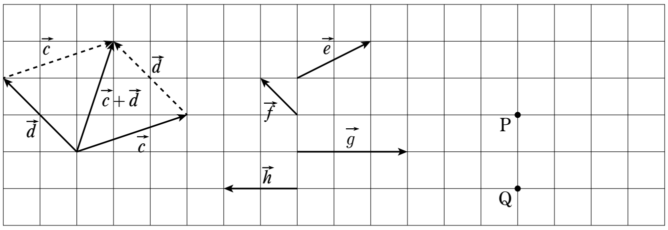
Chapter4　演習問題

ここでは，さまざまな風について考えるための準備として，力の合成や分解の練習をしましょう。

問題(1)　向きと大きさという 2 つの情報をもった数をベクトルといいます。ベクトルは矢印を用いて表すことができますが，位置の情報をもたないので，向きと大きさが同じであればどこにあっても同じベクトルだといえます。次の図の $\vec{a}$ と $\vec{b}$ を，それぞれ点 O を始点とするように描きましょう。

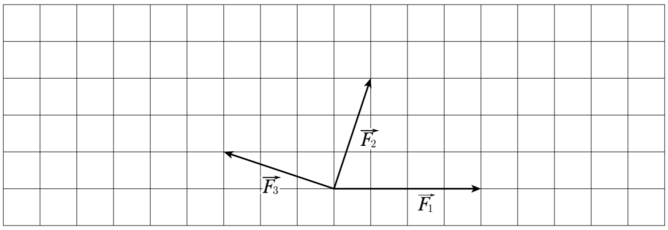


問題(2)　ベクトルどうしの和は，一方のベクトルの終点にもう一方のベクトルをつなげて描くことで求められます。たとえば，次の図のようにして $\vec{c}+\vec{d}$ を図示することができます。この例を参考に，点 P を始点として $\vec{e}+\vec{f}$ を，点 Q を始点として $\vec{g}+\vec{h}$ を，それぞれ描きましょう。

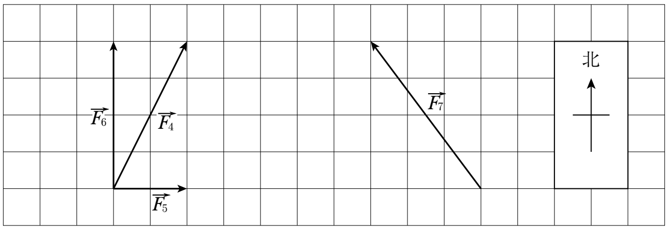


問題(3)　力は向きと大きさをもっているので，ベクトルだといえます。複数の力を表すベクトルの和を考えることを，力の合成といいます。次の図に示された3つの力 $\overrightarrow{F_1}$, $\overrightarrow{F_2}$, $\overrightarrow{F_3}$ を合成し，これらのベクトルと同じ点を始点として描きましょう。ただし，3つのベクトルの和は，2つのベクトルの和にもう1つのベクトルを加えることで求められます。

知っておこう
合成して得られる力を合力といいます。



問題(4)　空気塊にはたらく力を考えるとき，東西方向と南北方向のような，直交する2方向に分けて考えたいことがあります。たとえば，図の $\overrightarrow{F_4}$ は，東西方向の $\overrightarrow{F_5}$ と南北方向の $\overrightarrow{F_6}$ を用いて $\overrightarrow{F_4}=\overrightarrow{F_5}+\overrightarrow{F_6}$ と表せます。このように，力を表すベクトルを複数のベクトルの和で表すことを力の分解といいます。次の図に示された $\overrightarrow{F_7}$ を，東西方向と南北方向の2つのベクトルに分解し，ともに $\overrightarrow{F_7}$ と同じ点を始点として描きましょう。



第14講 PART2 確認問題

問1　次のア～エは，空気塊にはたらく4つの力を説明したものである。ア～エが表す力の組合せとして最も適当なものを，下の①～④のうちから一つ選べ。

ア　自転する地球上で観察したとき，運動する空気塊の進行方向を変えるようにはたらいて見える力
イ　空気塊が円運動するとき，円運動の中心と逆向きにはたらいて見える力
ウ　単位距離あたりの気圧差による力
エ　空気塊が地表付近を進むとき，風の流れが乱されることで進行方向と逆向きにはたらく力

①　ア：転向力　　イ：気圧傾度力
　　ウ：摩擦力　　エ：遠心力
②　ア：転向力　　イ：遠心力
　　ウ：気圧傾度力　　エ：摩擦力
③　ア：摩擦力　　イ：転向力
　　ウ：気圧傾度力　　エ：遠心力
④　ア：気圧傾度力　　イ：遠心力
　　ウ：転向力　　エ：摩擦力

問2　次の問いに答えよ。

(1)　気圧傾度力の向きについての記述として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。
①　等圧線と直交して高圧側から低圧側の向きにはたらく。
②　等圧線と直交して低圧側から高圧側の向きにはたらく。
③　等圧線の接線方向にはたらく。
④　鉛直方向にはたらく。

(2) 地球の自転角速度をΩとする。緯度ϕの位置で速さvで動く空気塊の単位質量あたりにはたらく転向力の大きさについての記述として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① $\Omega\cos\phi$に比例する。

② $\Omega\cos\phi$に反比例する。

③ $\Omega\sin\phi$に比例する。

④ $\Omega\sin\phi$に反比例する。

(3) 半径r，速さvの等速円運動をする空気塊の単位質量あたりにはたらく遠心力の大きさを表す式として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① rv　　② rv^2

③ $\dfrac{v}{r}$　　④ $\dfrac{v^2}{r}$

(4) 単位質量の空気塊にはたらく摩擦力についての記述として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① 大きさは風速に比例し，比例定数は海上より陸上の方が大きい。

② 大きさは風速に比例し，比例定数は海上より陸上の方が小さい。

③ 大きさは風速に反比例し，比例定数は海上より陸上の方が大きい。

④ 大きさは風速に反比例し，比例定数は海上より陸上の方が小さい。

第 14 講　大気の運動

PART1　地上天気図と等圧面天気図

問題(1)　【※図参照】

問題(2)　【※図参照】

問題(3)　大きく，背が低い，低い，低緯度側

PART2　空気塊にはたらく力

問題(1)　【※図参照】

問題(2)　【※図参照】

問題(3)　【※図参照】

問題(4)　【※図参照】

PART3　地衡風

問題(1)　低い，北向き，南向き，右向き，西から東，西風

問題(2)　半分，２倍，気圧傾度，比例，２倍

PART4　傾度風と地上風

問題(1)　ア：$\dfrac{v}{2r\Omega\sin\phi}$

問題(2)　イ：0.1，比例，反比例

問題(3)　【※図参照】

円運動の半径が大きく等圧線が直線に近いときや，風速が小さいとき

PART5　局地風

問題(1)　温まりやすい，高温，小さい，陸面，低温

問題(2)　大きい，大きい，低圧，高圧，高圧側から低圧側

問題(3)　南側，東西

PART6　季節風

問題⑴　低温，上昇，低気圧，下降，高気圧，北より，北より

問題⑵　高温，下降，高気圧，上昇，低気圧，南より，西より

問題⑶　熱帯収束帯，温帯低気圧，停滞前線

PART7　熱帯低気圧と台風

問題⑴　積乱雲，摩擦力，反時計回り

問題⑵　狭く，強い，17

問題⑶　南風，北風，南風，北風，反時計回り，
時計回り，高気圧，低気圧，高気圧，
15℃，高い，潜熱

PART8　偏西風波動と温帯低気圧

問題⑴　ア：$\frac{1}{2}Sh\rho_1$　イ：$\frac{1}{2}Sh\rho_2$　ウ：$\frac{1}{4}Sh^2g\rho_1$　エ：$\frac{1}{4}Sh^2g\rho_2$
オ：$\frac{1}{8}Sh^2g\rho_1$　カ：$\frac{3}{8}Sh^2g\rho_2$　キ：$\frac{1}{8}Sh^2g(\rho_1-\rho_2)$

問題⑵　低温側から高温側，寒気，高温側から低温側，暖気，
西側，東側，発達する

PART9　高気圧

問題⑴　亜熱帯高圧帯，ハドレー循環，放射冷却

問題⑵　3～5km，1～2km

第14講　PART2　確認問題　解答

問1　②

解説：
気圧傾度力は気圧差による力，転向力は地球の自転によって生じる見かけの力，遠心力は円運動の中心と逆向きにはたらく見かけの力，摩擦力は風の流れが乱されることで生じる力である。

問2

(1)　①

解説：
気圧傾度力の大きさは，気圧傾度に比例し，等圧線と直交する向きに高圧側から低圧側に向かってはたらく。

(2)　③

解説：
転向力の大きさは，水平面上での風速と緯度の正弦 (sin) との積に比例する。また，北半球では，転向力は空気塊の進行方向から直角右向きにはたらく。

(3)　④

解説：
遠心力は円運動の中心と逆向きにはたらき，その大きさは，風速の 2 乗に比例し，円運動の半径に反比例する。

(4)　①

解説：
摩擦力は進行方向と逆向きにはたらき，その大きさは風速に比例する。比例定数は海上より陸上の方が大きい。